

## Resum

El projecte final de carrera *Anàlisi d'un Aerogenerador d'Eix Vertical* pretén proposar millores en les pales d'un aerogenerador mitjançant una selecció de materials acurada. El projecte pot dividir-se en dos blocs, en el primer bloc es realitza una introducció als sistemes eòlics, explicant l'evolució que han patit al llarg del temps i presentant els models existents a partir d'un estudi de mercat. Seguidament es realitza un anàlisi dels aerogeneradors d'eix vertical on s'exposen les feroçes a les que està sotmeses les pales per poder realitzar unes posteriors propostes de millora.

En el segon bloc es realitza la selecció d'un material idoni per fabricar una pala d'aerogenerador fent ús de l'amplia base de dades de materials que ofereix el programari CES Selector Edupack. La selecció s'estructura al voltant de tres casos pràctics que avaluen les característiques a millorar. Un cop obtinguts el quatre materials més idonis per cada cas, es realitza una taula de ponderació amb les característiques per tal de seleccionar el material més idoni de tots.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>5</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>7</b>
2.1. Origen del projecte .....	7
2.2. Motivació .....	7
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>9</b>
3.1. Objectius del projecte .....	9
3.2. Abast del projecte .....	9
<b>4. ENERGIA EÒLICA</b>	<b>11</b>
4.1. Historia i usos .....	11
4.2. Aerogeneradors .....	14
4.2.1. Introducció .....	14
4.2.2. Parts d'un aerogenerador .....	14
4.3. Tipus d'aerogeneradors .....	16
4.3.1. Aerogeneradors d'eix Horitzontal (HAWT) .....	16
4.3.2. Aerogeneradors d'eix Vertical (VAWT) .....	16
4.4. Estudi de mercat .....	19
<b>5. ANÀLISIS D'UN AEROGENERADOR D'EIX VERTICAL</b>	<b>22</b>
5.1. Característiques .....	22
5.2. Potència de l'aerogenerador .....	22
5.3. Esforços a les pales .....	24
5.4. Esforços deguts al perfil .....	26
<b>6. SELECCIÓ DE MATERIALS</b>	<b>28</b>
6.1. Definició dels paràmetres a millorar .....	28
6.2. Càlculs de l'aerogenerador actual .....	28
6.3. CES Selector .....	29
6.3.1. Cas 1: Selecció del material amb el mínim angle de deflexió .....	30
6.3.2. Cas 2 Selecció del material amb el mínim gruix del perfil .....	34
6.3.3. Cas 3 Selecció del material amb mínim cost .....	36
6.4. Materials seleccionats .....	40

6.5. Taula de ponderació .....	41
<b>7. EXPOSICIÓ DELS RESULTATS</b> .....	<b>44</b>
<b>8. ESTUDI ECONÒMIC</b> .....	<b>45</b>
<b>9. IMPACTE AMBIENTAL</b> .....	<b>46</b>
<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>47</b>
<b>AGRAÏMENTS</b> .....	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>51</b>
9.1. Referències bibliogràfiques.....	51

## 1. Glossari

**VAWT** Acrònim anglès genèric (Vertical Axis Wind Turbine) per referir-se als aerogeneradors d'eix vertical.

**HAWT** Acrònim anglès genèric (Horizontal Axis Wind Turbine) per referir-se als aerogeneradors d'eix horitzontal.

**P** potencia

**C<sub>p</sub>** Coeficient de Betz

**$\rho$**  Densitat

**A** Àrea

**V** Velocitat

**V<sub>n</sub>** Velocitat normal

**V<sub>r</sub>** Velocitat relativa

**V<sub>i</sub>** Velocitat induïda

**F<sub>t</sub>** Força tangencial

**T** Torsió

**K** Moment d'inèrcia

**Q** Moment d'inèrcia

**G** Mòdul de cisalla

**$\sigma_{le}$**  Límit elàstic

**$\Theta$**  Angle de deflexió

**t** gruix

**C** Cost

**C<sub>mat</sub>** Cost del material



## **2. Prefaci**

### **2.1. Origen del projecte**

El treball realitzat en aquest projecte, ha sorgit gracies a la col·laboració de la empresa Industrias Technoflex.

Durant els darrers anys, Industrias Technoflex ha realitzat una forta entrada en el camp de les energies renovables com a productor d'aerogeneradors, i donada la seva voluntat de desenvolupament continu, ha sorgit la necessitat de estudiar la millora de propietats de les pales d'un aerogenerador, com la deflexió angular, el gruix del perfil de les pales d'un aerogenerador, així com disminuir el seu cost.

### **2.2. Motivació**

Donada la voluntat de millora de l'empresa en els seus productes, en veure (mitjançant la realització d'un estudi de mercat) la diferència de materials que existeix en la producció de les pales dels aerogeneradors entre els productors de la competència (que es mouen en les famílies dels compòsits) i els aerogeneradors produïts per Industrias Technoflex (que opta pels metalls), es crea la necessitat de discernir quin són els materials més adequats per a la producció i si es poden millorar.





## **3. Introducció**

### **3.1. Objectius del projecte**

L'objectiu del projecte es buscar el material més adient per fabricar pales d'aerogeneradors, que permeti al productor Industrias Technoflex, aconseguir la major resistència, juntament amb la reducció del material necessari i amb el mínim cost possible.

### **3.2. Abast del projecte**

La selecció de materials realitzada en el present projecte, pren com a base la millora d'un dels aerogeneradors de la companyia Industrias Technoflex, el Tornado 5000.

Durant la recerca dels requeriments de millora en una pala d'aerogenerador, s'han prioritzat aquells que influeixen directament de la selecció del material i no d'altres com podrien ser la geometria del perfil.

Sent conscient que abans de realitzar una producció d'aerogeneradors caldria tenir en compte altres factors, amb la realització d'aquest projecte, s'aconsegueix el propòsit de suggerir un material capaç de millorar les característiques que presenten les pales que es produeixen actualment.



## 4. Energia eòlica

### 4.1. Historia i usos

La primera referència històrica que existeix sobre el molins eòlics, data del segle 1 A.C a Alexandria. Segons les descripcions es tractava d'un molí que insuflava aire a un òrgan per a fer-lo funcionar.<sup>1</sup>

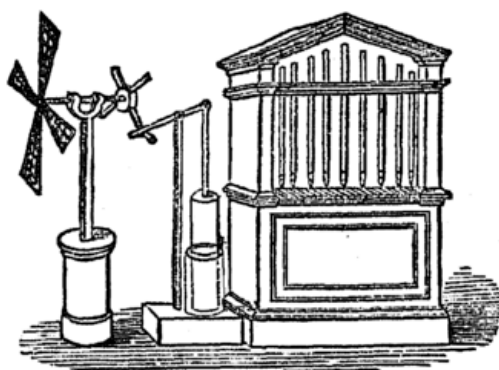


Fig. 4.1 Recreació del sistema eòlic d'Alexandria<sup>2</sup>.

La següent referència de la que disposem ja en el segle 9 D.C es situa a la regió de Siestan de l'antiga Pèrsia (actualment localitzada a l'est de l'Iran). Es tractaven de molins d'eix vertical (Com es pot veure a la Fig. 4.2) integrats en construccions de tova per a reduir les turbulències del vent.



---

Fig. 4.2 Molins eòlics tradicionals perses<sup>3</sup>.

No va ser fins al segle 12 D.C, que es va documentar l'ús de molins a Europa, on ja presentaven l'eix de rotació en horitzontal passant del sistema d'arrossegament (Drag) dels molins de Pèrsia a un sistema de sustentació (Lift). Aquest molins ja presentaven una major eficiència que no tenien els seus predecessors. No està clar com es va dur a terme aquest canvi en el disseny, però si que és cert que a partir d'aquell moment i fins a la revolució industrial, els molins de vent van anar guanyant importància. El disseny va anar evolucionant al llarg dels anys fins al model Smock Windmill en el que només calia moure la part superior del molí per poder orientar-lo cap al vent.



---

Fig. 4.3 Molí Smock Windmill<sup>4</sup>

Va ser ja en el segle XVIII quan es va arribar a la culminació en l'ús de molins eòlics arribant a incorporar elements de disseny que més tard servien per als aerogeneradors. Curiosament, mentre a Europa l'energia eòlica començava a perdre terreny vers altres energies com la obtinguda del carbó, a Estats Units guanyava força a les granges (sobretot a les de l'est del país) per fer-ne ús bombejant aigua dels pous.

No va ser fins al segle XIX que van començar a aparèixer els primers aerogeneradors primitius, com el de Marcellus Jacobs (Fig. 4.4) que en relació amb els anteriors ja presentava una reducció de dimensions i un sistema de bateries per poder fer un ús domèstic de la electricitat.



---

Fig. 4.4 Marcellus Jacobs amb el seu aerogenerador.<sup>5</sup>

Amb l'arribada de l'electrificació al segle XX, els petits sistemes aerogeneradors van anar quedant desplaçats. Tot i això, es va continuar amb el desenvolupament d'aerogeneradors però a un nivell més experimental, ja que el gruix del consum es produïa de la xarxa central.

No va ser fins a la dècada de 1960 que la generació d'electricitat a partir d'energia eòlica va començar un tímid ressorgir, gràcies a una creixent consciència ecològica vers el combustibles fòssils, la desconfiança en l'energia nuclear i els perills que comportava. Aquesta reactivació, va permetre continuar l'evolució en el disseny dels aerogeneradors fins als models més innovadors d'avui en dia.

## 4.2. Aerogeneradors

### 4.2.1. Introducció

Un aerogenerador és l'aparell que és capaç de transformar l'energia del vent (eòlica), en energia elèctrica per al consum.

Inicialment l'energia eòlica només era usada pel seu potencial mecànic mitjançant molins. Com s'ha mencionat en l'apartat anterior, no va ser fins a principis del segle XX amb l'aparició dels sistemes elèctrics que es va començar a experimentar amb la idea de transformar aquell molins de vent el en que avui es coneix com a aerogeneradors.

### 4.2.2. Parts d'un aerogenerador

Tot i existir diferents tipus d'aerogeneradors, tots comparteixen un alt percentatge d'elements comuns. Les parts en les que els podem dividir a grans trets són:

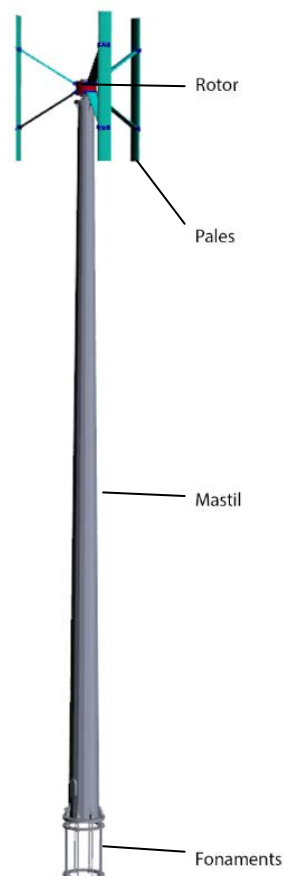


Fig. 4.5 Parts d'un aerogenerador<sup>6</sup>

- **Fonaments:** És la part estructural que suporta totes les tensions. Tot i no ser una part en si del propi aerogenerador, els fonaments són una part important a tenir en compte degut a que són els responsables de que l'aerogenerador segueixi enclavat al terra i no caigui mentre es troba en funcionament.
- **Màstil:** Aquest és un element comú en tots els aerogeneradors, és l'encarregat d'alçar el rotor a una distància adequada del terra per poder captar l'energia del vent de manera òptima. Tot i que generalment desenvolupen la funció ja esmentada, en l'aerogenerador tipus Darrieus (que es presenta en l'apartat 5.3) no eleva el rotor, si no que l'usa d'eix de gir, ja que aquest tipus de aerogenerador es troba a ran de terra.
- **Rotor:** Es tracta de la part superior dels aerogeneradors, en ella es troba el generador, així com tots els elements necessaris per a la subjecció de les pales.
- **Pales:** Situades a la part superior i unides al rotor, són les encarregades de rebre l'energia eòlica, i transformar-la en moviment per a que el generador que es troba en el rotor, la transformi en energia elèctrica. Solen basar el seu disseny en uns perfils aerodinàmics anomenats NACA<sup>7</sup>, desenvolupats als Estats units durant la primera meitat del segle XX.

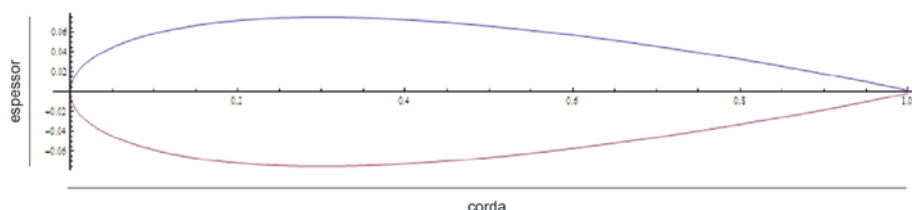


Fig. 4.6 Perfil NACA 00XX<sup>8</sup>

Els perfils NACA basen la seva nomenclatura en la seva geometria. Per el cas que s'analitzarà en aquest projecte, el NACA 0022, en que els dos números inicials són zero, indica que es tracta d'un perfil simètric. Els altres dos dígitos fan referència a la proporcionalitat màxima que pot existir entre la corda i l'espessor del perfil que en el cas del NACA 0022, l'espessor pot suposar un màxim del 22% de la longitud de la corda.

### **4.3. Tipus d'aerogeneradors**

Els aerogeneradors es poden dividir en dues grans famílies segons la disposició del seu eix de rotació. Són aerogeneradors d'eix horitzontal o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) i d'eix vertical o VAWT (Vertical Axis Wind Turbine).

#### **4.3.1. Aerogeneradors d'eix Horitzontal (HAWT)**

Els aerogeneradors d'eix horitzontal, són els més estesos en la producció d'energia elèctrica, es caracteritzen principalment per tenir l'eix de rotació orientat de forma paral·lela al terra. Generalment presenten tres pales (tot i que n'hi ha de dues i d'una).

Entre els avantatges que presenten, es troba la seva capacitat de control del gir gràcies a la capacitat d'orientació de l'angle d'atac les pales, aprofitant al màxim la potència disponible del vent. Per contra no es poden situar prop del terra ni d'altres molins degut a les turbulències que generen durant el gir.



Fig. 4.7 Aerogeneradors tipus HAWT.<sup>9</sup>

#### **4.3.2. Aerogeneradors d'eix Vertical (VAWT)**

Els aerogeneradors d'eix vertical, es caracteritzen principalment per tenir l'eix de rotació disposat en vertical en referència al terra. El seu ús està menys estès degut a que hi ha



hagut un menor desenvolupament tecnològic i tenen un menor rendiment, però actualment estan experimentant un renaixement gràcies a la implementació dels sistemes minieòlics.

Presenten avantatges en front dels aerogeneradors d'eix horitzontal, com la generació d'electricitat independentment de la direcció del vent gràcies a la disposició vertical de les pales. Per altre banda al no generar les turbulències que generen els HAWT, es poden situar més a prop els uns dels altres, així com del terra; incrementant la producció en un mateix espai.

Altres característiques que els fan atractius són que disposen d'un menor número de peces (menor manteniment) i necessiten una velocitat inferior d'arrencada. Per contra al no disposar de pales orientables fa que sigui més difícil el control de velocitat de gir.

Dins dels aerogeneradors d'eix vertical podem distingir entre el Savonius, el Darrieus i els Darrieus tipus H.

#### 4.3.2.1. Aerogenerador Savonius

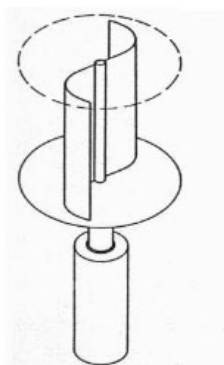


Fig. 4.8 Aerogenerador tipus Savonius.<sup>10</sup>

Inventats per l'enginyer francès Sigurd Johannes Savonius al 1922, els aerogeneradors Savonius (Fig. 4.8) presenten un funcionament simple per arrossegament. Es conformen per dos semicilindres units a un eix central.

#### 4.3.2.2. Aerogenerador Darrieus



Fig. 4.9 Aerogenerador tipus Darrieus.<sup>11</sup>

L'aerogenerador tipus Darrieus (Fig. 4.9) patentat l'any 1931 per l'enginyer Georges Darrieus, presenta respecte els seus antecessors una variació substancial disposant les pales unides pels extrems a l'eix de rotació i amb la part del centre separada. Aquest canvis permeten a l'aerogenerador tipus Darrieus girar a velocitats de vent menors a 4m/s.

Tot i haver demostrat una major eficiència que els tipus Savonius presenten l'inconvenient de que necessiten d'un sistema d'arrencada auxiliar per poder començar a girar. Un mètode per poder resoldre aquest problema sense la necessitat d'un motor extern, és la combinació d'un aerogenerador Savonius amb un Darrieus.

#### 4.3.2.3. Aerogenerador Darrieus tipus H



Fig. 4.10 Aerogenerador Darrieus tipus H de 3 pales.<sup>12</sup>

Aquest tipus d'aerogenerador (Fig. 4.10) subproducte de l'aerogenerador Darrieus, a diferència del seu precursor Darrieus, presenta pales rectes unides a un eix central de gir mitjançant suports horitzontals. Per altre banda també presenta la necessitat d'un sistema d'arrencada auxiliar. Tot i que en la seva versió més estesa solen presentar tres pales, es poden trobar configuracions de quatre i cinc pales depenent de les necessitats.

#### **4.3.2.4. Aerogenerador Darrieus tipus helicoïdal**



Fig. 4.11 Aerogenerador Tipus helicoïdal.<sup>13</sup>

Aquest model (Fig. 4.11) presenta millores en el disseny respecte l'aerogenerador Darrieus tipus H, disposant les pales amb formes helicoïdals. Aquest tipus de disposició de les pales permet un gir més fluid amb el que es resolen els problemes de vibracions.

### **4.4. Estudi de mercat**

A l'hora de realitzar l'estudi per a la selecció d'un material òptim per a la fabricació d'una pala d'aerogenerador és adient dur a terme un estudi de mercat per tal de saber quines són els materials que usen les altres companyies a l'hora de fabricar les seves pales pels aerogeneradors.

En aquest estudi, només figuren aerogeneradors de 5kW, ja que el projecte es basa en la millora d'un aerogenerador d'aquesta potència. Al realitzar l'estudi, es tindran en compte les dimensions dels rotors, els tipus de pales i el material del que estan fetes. La taula següent recull les característiques dels aerogeneradors de les principals empreses productores.

Taula 4.1 Aerogeneradors de 5kW disponibles al mercat.

Empresa	Model	Diàmetre rotor (m)	Longitud pala (m)	Tipus de pala	Material
Urban Green <sup>14</sup>	UGE-4K	3	4,6	Helicoïdal	Compost de Fibra de vidre
Ropatec <sup>15</sup>	6Kw	4,7	2,5	Plana	Compost de Fibra de vidre i carboni
Ropatec <sup>16</sup>	T5 Pro	5	4	Plana	Compost de Fibra de vidre i alumini
Quite Revolution <sup>17</sup>	Qr5	3,1	5	Helicoïdal	Compost de Fibra de carboni
Kliux <sup>18</sup>	Geo4K	2	3	Savonius	Poliuretà expandit
Windworks <sup>19</sup>	WW5000	2,6	5,5	Savonius	Fibra de vidre
Sawt <sup>20</sup>	P5000	4	4,6	Plana	Alumini
Technoflex <sup>21</sup>	Tornado 5000	2.3	2,7	Plana	Alumini

Com es pot veure a la taula anterior, pel que fa al tipus de pala, no hi ha un tipus predominant sobre els altres, hi ha una distribució homogènia entre els diferents models.

Per altre banda, també es pot observar que pel que fa referència als materials de fabricació de les pales, existeix una clara predominança en l'ús de materials compostos de fibra de vidre entesa com a reforç en una matriu de resina (els fabricants no especifiquen quin tipus). Altres materials que també són usats encara que amb en menor quantitat són, la fibra de

carboni (tant sola com en combinació amb la fibra de vidre) com a reforç, l'alumini i el poliuretà expandit.

De l'estudi de mercat realitzat, es pot extreure a mode de previsió, que si els diferents productors han seguit un procés de selecció basat en criteris enginyerils a l'hora de seleccionar el material, el resultat que s'obtingui de la selecció que es durà a terme en els apartats posteriors sigui un material compost amb una matriu de resina amb reforç de fibra de vidre.

## 5. Anàlisi d'un aerogenerador d'eix vertical

En aquest capítol s'analitzarà un aerogenerador d'eix vertical (VAWT) de 5 kW de l'empresa Technoflex, com a referència per introduir les millores. S'analitzarà l'aerogenerador per determinar quins són els esforços més crítics als que estan sotmeses les pales per tal de poder realitzar una millora en el rendiment a partir d'una millora en la selecció de materials,

### 5.1. Característiques

Taula 5.1 Característiques de l'aerogenerador Tornado 5000

Aerogenerador Tornado 5000	
Potencia	5 kW
Diàmetre Rotor	2,3 m
Longitud de pala	2,7 m
Número de pales	3
Perfil aerodinàmic	NACA 0022
Material	Al 6005 T6

### 5.2. Potència de l'aerogenerador

La potència que es pot extreure d'un aerogenerador ( $P_{disponible}$ ) ve donada per la potència que es pot extreure del vent que es defineix amb la següent expressió.<sup>22</sup>

$$P_{disponible} = \frac{1}{2} \rho A V^2 \quad \text{Equació 5.1}$$

On  $\rho$  és la densitat de l'aire en ( $\text{kg/m}^3$ ) i  $A$  l'àrea efectiva de l'aerogenerador en ( $\text{m}^2$ ) i  $V$  la velocitat del vent en ( $\text{m/s}$ )

Donat que no es tracta d'un cas ideal i que la potència extreta per l'aerogenerador no pot ésser el 100% de l'energia que disposa el vent, se li ha de aplicar el coeficient de potència, conegut com el Límit de Betz.

La teoria del límit de Betz desenvolupada per Albert Betz l'any 1920<sup>23</sup> ens enuncia que a major potència extreta a les partícules que passen pel rotor d'un aerogenerador, menor serà la seva energia cinètica a la sortida del rotor. Per tant si aquestes partícules acaben perdent tota la seva energia cinètica, no permetran creuar a les següents impeding així que continuï la generació d'energia. Betz va calcular que la potència màxima que es podia ser extreta per un aerogenerador és del 59,3%.

Aplicant el coeficient de Betz podem saber quina és la potència real que pot extreure el nostre aerogenerador amb la següent expressió

$$P_{extreta} = \frac{1}{2} C_p \rho A V^2 \quad \text{Equació 5.2}$$

On  $C_p$  és coeficient de potencia (límit de Betz),  $\rho$  és la densitat de l'aire en ( $\text{kg/m}^3$ ) i  $A$  l'àrea efectiva de l'aerogenerador en ( $\text{m}^2$ ) i  $V$  la velocitat del vent en ( $\text{m/s}$ ).

### 5.3. Esforços a les pales<sup>24</sup>

En aquest apartat, es comentaran esforços als quals estan sotmesos les pales d'un aerogenerador. Es farà especial atenció a com calcular la torsió que es genera durant el gir en una pala, ja que es tracta d'un dels esforços crítics per a que l'aerogenerador tingui un bon funcionament.

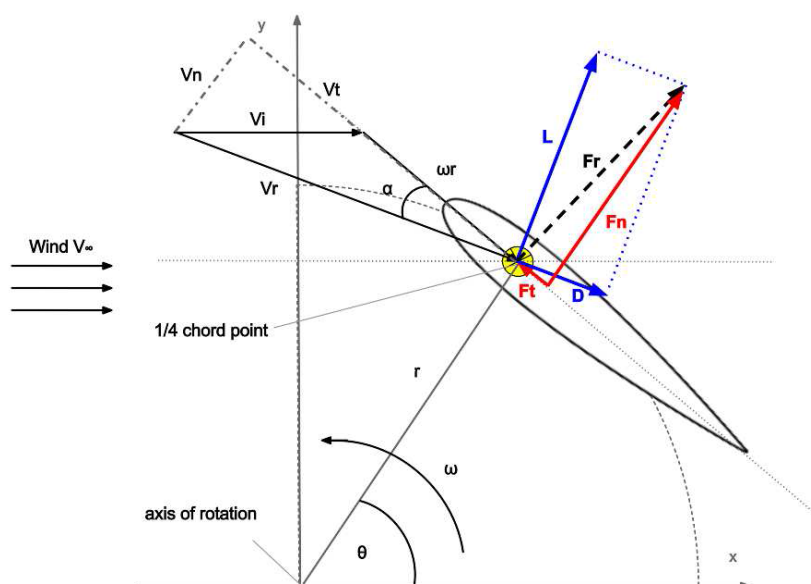


Fig. 5.1. Diagrama de les forces resultants en una pala d'aerogenerador

Com es mostra a la Fig. 5.1, la pala de l'aerogenerador al girar experimenta una velocitat relativa ( $V_r$ ) que incideix en un angle d'atac  $\alpha$  respecte la corda del perfil. Aquesta velocitat relativa, ve donada pel sumatori de la velocitat de rotació (rad/s) i la velocitat induïda ( $V_i$  en m/s). La velocitat induïda es funció de la velocitat del vent i el factor d'inducció, que representa la desacceleració del vent a mesura que passa a través del rotor.

La magnitud i l'angle d'atac de la velocitat relativa ( $V_r$ ) es pot calcular a partir de les components de la velocitat tangencial i normal mitjançant les següents equacions:

$$V_n = V_r \sin \alpha = V_i \cos \theta \quad \text{Equació 5.3}$$

On  $V_n$  és la velocitat normal (m/s),  $V_r$  la velocitat resultant (m/s),  $\alpha$  és l'angle d'atac (graus) i  $\theta$  és l'azimut (graus).

$$V_t = V_r \cos \alpha = V_i \sin \theta + \omega r \quad \text{Equació 5.4}$$



On  $V_t$  és la velocitat tangencial (m/s),  $V_r$  la velocitat resultant (m/s),  $V_i$  la velocitat induïda (m/s),  $\theta$  l'azimut (graus),  $\omega$  la velocitat angular (rad/s) i  $r$  el radi (m).

A partir de les equivalències de les equacions anteriors, es pot aïllar l'angle d'atac  $\alpha$ .

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{V_i \cos \theta}{V_i \sin \theta + \omega r} \quad \text{Equació 5.5}$$

On  $\alpha$  és l'angle d'atac (graus),  $V_i$  és la velocitat induïda (m/s), la velocitat angular (rad/s) i  $r$  el radi (m).

La velocitat relativa exerceix a les pales una força d'empenta  $L$  (Lift) i una d'arrossegament  $D$  (Drag) que actuen de manera perpendicular i paral·lela, respectivament, en referència a la direcció. Aquestes forces varien segon el tipus de pala ja que depenen del tipus de perfil NACA emprat.

Com s'ha mencionat a l'inici d'aquest apartat, és més interessant l'estudi de les forces en el sentit del moviment com la Força tangencial,  $F_t$ , que és la que acaba generant l'esforç de torsió i per tant la potència. La força resultant de la força de sustentació i arrossegament, pot descomposar-se en força tangencial i normal. La força tangencial per unitat de longitud per un angle d'atac  $\alpha$ , ve donada per:

$$F_t = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad \text{Equació 5.6}$$

On  $F_t$  és la força tangencial (N),  $L$  és el coeficient de sustentació,  $D$  és el coeficient d'arrossegament i  $\alpha$  és l'angle d'atac (graus).

Per obtenir la força tangencial sobre tota la longitud de la pala  $F_{t \text{ pala}}$ , la força per unitat longitud s'integra al llarg de la longitud de la pala,  $h$ :

$$F_{t \text{ pala}} = \int_0^h F_t dh \quad \text{Equació 5.7}$$

On  $F_t$  és la força tangencial (N),  $h$  és la longitud de la pala (m).

Aquestes forces actuen totes a través del centre aerodinàmic de la turbina, que en el cas d'un perfil aerodinàmic simètric es troba a 1/4 de la corda.

Per obtenir l'esforç de torsió generat en una turbina amb N pales, tan sols s'ha de multiplicar la força tangencial i el radi fins al centre de rotació.

$$T = N F_t pala R \quad \text{Equació 5.8}$$

On T és la torsió (N·m), N és el número de pales,  $F_t$  és la força tangencial (N) i R el radi del rotor (m).

#### 5.4. **Esforsos deguts al perfil**

Els perfils aerodinàmics, en el pla vertical, degut tant a la seva forma i longitud com a la incisió del vent, també pateixen d'esforços de deflexió angular i tallants. Aquests esforços suposen un gran inconvenient per al seu correcte funcionament, ja que poden ocasionar deformacions i interferir en l'aerodinàmica l'aerogenerador. Per altra banda, aquests esforços, es poden tractar de minimitzar coneixent les propietats dels materials emprats en la fabricació.

L'esforç tallant (Equació 5.10) i la deflexió angular (Equació 5.9) per a una secció no circular venen donades per les següents expressions.<sup>25</sup>

$$\theta = \frac{T \times l}{K \times G} \quad \text{Equació 5.9}$$

On T és la torsió (N·m), l és la longitud (m), K és el moment d'inèrcia i G és el mòdul de cisalla (GPa).

$$\tau = \frac{T}{Q} \quad \text{Equació 5.10}$$

On T és la torsió (N·m) i Q és el moment d'inèrcia

Si tenim en compte que a l'hora de realitzar l'anàlisi es considerarà com un cas amb deformació sense cedència, l'esforç tallant compleix la següent expressió (Equació 5.11).

$$\tau = \frac{1}{2} \times \sigma_{le}$$

Equació 5.11

On  $\sigma_{le}$  és el límit elàstic (MPa)

Igualant l'expressió del l'esforç tallant amb la de l'esforç tallant per a una deformació sense cedència obtenim:

$$\frac{T}{Q} = \frac{1}{2} \times \sigma_{le}$$

Equació 5.12

D'on al aïllar la torsió queda la següent expressió.

$$T = \frac{Q \times \sigma_{le}}{2}$$

Equació 5.13

Al substituir la torsió (Equació 5.13), a la Torsió de la expressió la deflexió angular, resulta la següent expressió.

$$\theta = \frac{Q \times \sigma_{le} \times L}{K \times G}$$

Equació 5.14

On Q és el moment d'inèrcia Q,  $\sigma_{le}$  és el límit elàstic (MPa), l és la longitud de la pala (m), K és el moment d'inèrcia K i G és el mòdul de cisalla (GPa).

## 6. Selecció de materials

### 6.1. Definició dels paràmetres a millorar

Seguint els criteris de l'apartat anterior i les dades facilitades per l'empresa Technoflex s'han obtingut les dades següents:

Taula 6.1 Objectius de millora en l'aerogenerador Tornado 5000

	Tornado 5000	Objectiu
Material	AL 6005-T6	-
Angle de deflexió	0,27 °	Reducció
Densitat del material (kg/m <sup>3</sup> )	2.700	Reducció
Gruix del perfil (mm)	2,5	Reducció
Cost (€/kg)	1,7	Reducció

En la taula anterior (Taula 6.1), s'exposen les característiques que es marquen com a objectius a millorar mitjançant una selecció de materials, per a poder optimitzar el funcionament de l'aerogenerador.

### 6.2. Càlculs de l'aerogenerador actual

Actualment, l'aerogenerador Tornado 5000 es realitza amb un perfil tipus NACA 0022 amb les següents dimensions.

Taula 6.2 Dimensions del Perfil NACA 0022

	NACA 0022
Corda (m)	0,5
Espessor (m)	0,11

Per facilitar els càlculs per al perfil NACA 0022, es prendrà per aproximació com una forma el·líptica buida, per tant les expressions del moment d'inèrcia K i Q són les següents:

$$K = \frac{4\pi(ab)^{5/2}t}{(a^2+b^2)} \quad \text{Equació 6.1}$$

On a i b són els semieixos de l'el·lipse (m) i t és el gruix del perfil (m).

$$Q = 2\pi t(a^3b)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Equació 6.2}$$

On a i b són els semieixos de l'el·lipse (m) i t és el gruix del perfil (m).

A l'aplicar aquestes expressions a les exposades en el apartat 5.4, podem arribar a trobar l'angle de deflexió que pateix la pala de l'aerogenerador, sent en el cas present, per a un alumini 6005 T6 de;  $\theta = 0.27^\circ$ .

### 6.3. CES Selector

Per poder decidir quin és el material més convenient per construir la pala de l'aerogenerador, es plantejaran tres casos en els que es podrà veure quines són els materials més adients per a les diferents opcions depenent de la propietat que es vulgui millorar.

Per a realitzar la selecció, es farà ús del programari CES selector Edupack, desenvolupat per Granta design. Es tracta d'una eina de gran utilitat gracies a que disposa d'una extensa base de dades de materials amb les seves propietats. Per altra banda, permet realitzar (com

es veurà en posteriors apartats), l'extracció de diagrames d'Ashby comparatius amb les propietats més convenients per a cada cas.

### 6.3.1. Cas 1: Selecció del material amb el mínim angle de deflexió

Amb les dades obtingudes a l'apartat 6.2 es farà us en el programa CES selector Edupack per determinar quines són les famílies més adequades per a la pala de l'aerogenerador.

A partir de la expressió (Equació 5.14), s'aïlla sota el factor comú  $A'$  els factors que corresponen als paràmetres de forma.

$$\theta = A' \times \frac{\sigma_{le}}{G} \quad \text{Equació 6.3}$$

Així doncs es pot extreure de la expressió anterior l'índex de selecció.

$$M = \frac{\sigma_{le}}{G} \quad \text{Equació 6.4}$$

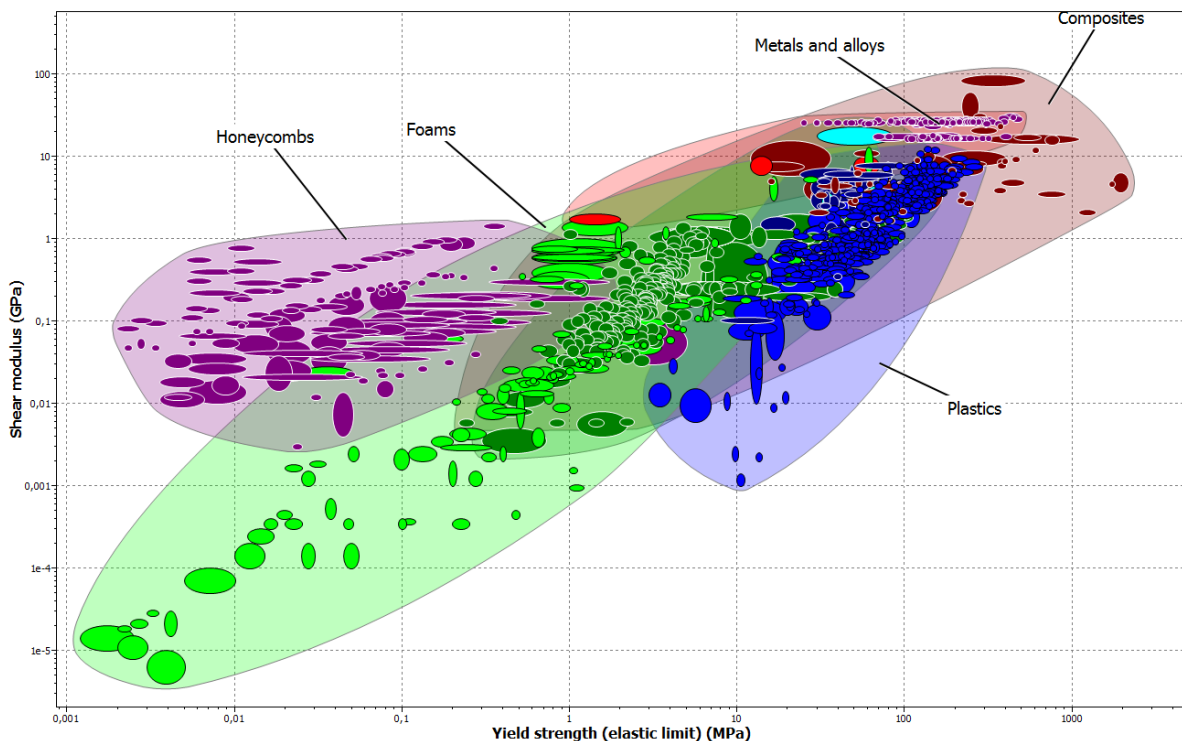


Fig. 6.1 Diagrama d'Ashby. Modul de cisalla vers límit elàstic.

El que es busca és el material amb la màxima relació  $G/\sigma_{le}$ , a l'hora que es vol un material amb el mòdul de cisalla i límit elàstic el més alts possible. Donat que això és impossible de realitzar, prioritzarem el mòdul de cisalla ( $G$ ). Per tant el material amb el màxim índex de material  $M$  es troba a la part superior esquerra de la figura anterior.

Per trobar el pendent a partir de l'índex de selecció, s'apliquen logaritmes (el diagrama d'Ashby es troba en escala logarítmica) d'on resulta  $\log G = \log M - \log \sigma_{le}$ . Per tant, al representar el mòdul de cisalla,  $G$ , front al límit elàstic,  $\sigma_{le}$ , el pendent de la recta és de 1 ( $45^\circ$ ).

A l'aplicar el pendent en el diagrama d'Ashby representat pel programa CES Edupack, s'observa que la primera família de materials a que compleix és la dels Honeycombs (panells d'abella). Aquesta família, tot i que presenta una baixa densitat, disposa d'un mòdul de cisalla i límit elàstic molt inferior al del material emprat actualment, i és per això que es realitza la limitació establint com a mínims els mòduls de cisalla i límit elàstic del material actual (Al 6005 T6), que són 26,2 GPa i 212 MPa respectivament.

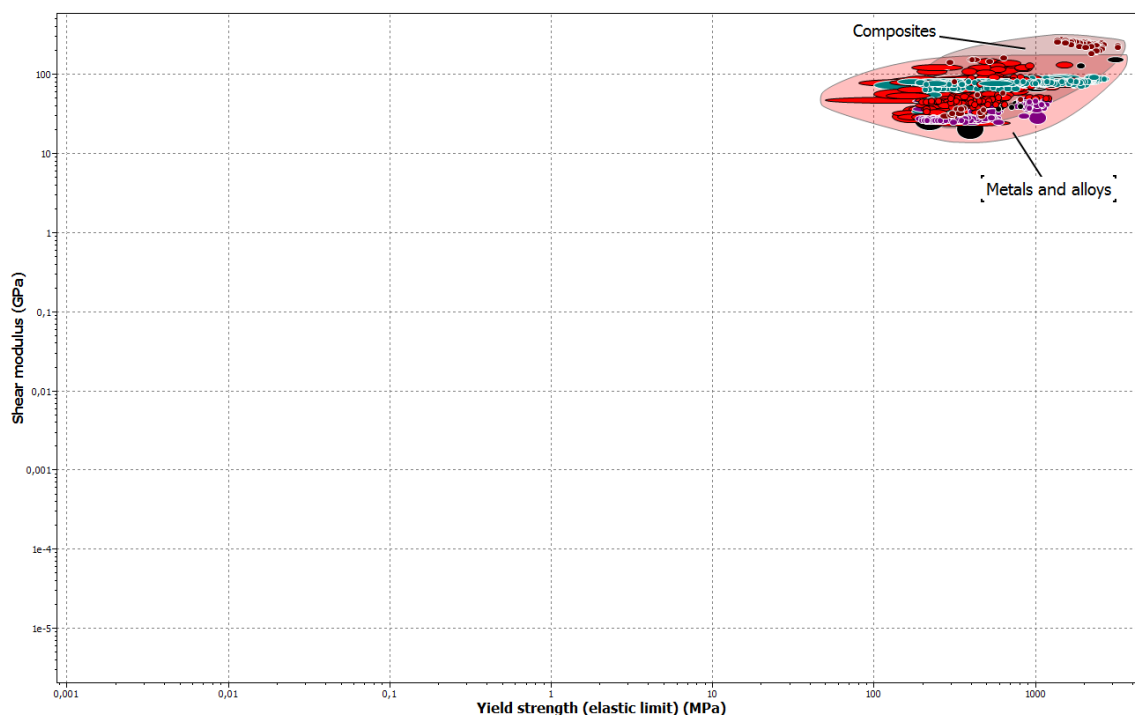


Fig. 6.2 Diagrama d'Ashby. Reducció del nombre de famílies al aplicar restriccions de materials

Al haver aplicat aquestes restriccions el nombre de famílies de materials a les que es pot optar ja es veu reduït a tan sols dues, els compòsits i els metalls.

Per seguir acotant la selecció es traça la recta del pendent per obtenir els deu millors materials per a un mínim angle de deflexió.

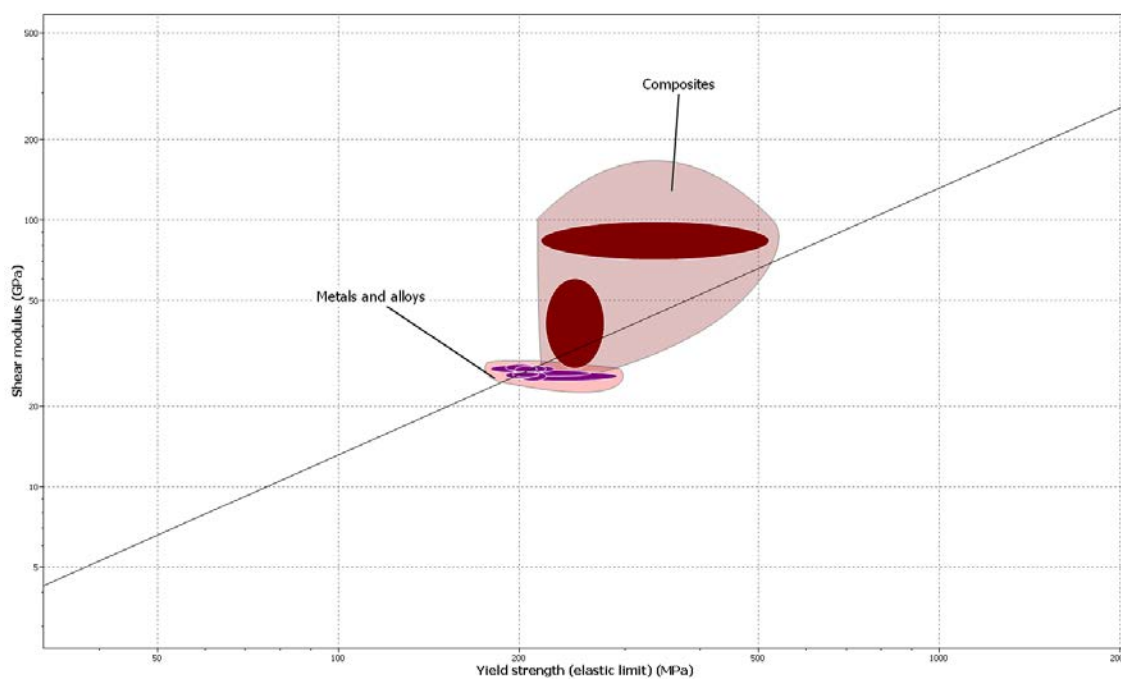


Fig. 6.3 Diagrama d'Ashby. Materials adequats a l' aplicar el pendent de l'índex de selecció.



Un cop aplicada aquesta limitació, els deu materials amb el millor índex de material i els seus valors de densitat, mòdul de cisalla i densitat es llisten per ordre a la taula següent:

Taula 6.3 Millors materials per a un mínim angle de deflexió

Material	Mòdul de cisalla (GPa)	Límit Elàstic (MPa)
Fenòlic/E-glass fiber	71,5-98,2	217-520
Epoxi SMC (fibra de carboni)	27,8-60,5	221-276
Alumini 2010, forja, T62	27,3-28,7	190-210
Alumini 5456, forja, H321	27-28,4	193-228
Alumini 5083, forja, H321	27-28,4	193-221
Alumini 5454, forja, H34	27-28,4	193-213
Alumini 5052, forja, H36	27-28,4	200-221
Alumini 5086, forja, H32	27-28,4	179-207
Alumini A356.0, fosa sorra, T6	26,7-28,2	197-213
Alumini C355.0, fosa sorra,T6	25,6-27	190-210

Com es pot apreciar a la Taula 6.3 segons el criteri aplicat, el material amb major idoneïtat per a la producció d'una pala d'aerogenerador, és el compòsit de fibra de vidre tipus E en una matriu fenòlica. Aquest material és el que presenta una millor relació de mòdul de cisalla vers límit elàstic.

### 6.3.2. Cas 2 Selecció del material amb el mínim gruix del perfil

Per analitzar el cas en el que el gruix del material s'ha de reduir al mínim, es prendrà com a paràmetres fixes les dimensions del perfil, la longitud de la pala i per tant també la torsió que suporta l'aerogenerador

Partint de les expressions de l'angle de deflexió  $\theta$  i el moment d'inèrcia  $K$ , es pot arribar a aïllar el factor  $t$  que representa el gruix del material, per a poder obtenir un índex de selecció.

$$\theta = \frac{T \times l}{K \times G} \quad \text{Equació 5.9}$$

On  $T$  és la torsió (N·m),  $l$  és la longitud (m),  $K$  és el moment d'inèrcia i  $G$  és el mòdul de cisalla (GPa).

$$K = \frac{4\pi(ab)^{5/2}t}{(a^2+b^2)} \quad \text{Equació 6.1}$$

On  $a$  i  $b$  són els semieixos de l'el·lipse (m) i  $t$  és el gruix del perfil (m).

D'on tenint en compte els paràmetres fixes s'extreu que:

$$\theta = \frac{T l (a^2+b^2)}{4\pi(ab)^{5/2} t G} \leq 0,0048 \quad \text{Equació 6.5}$$

On  $\theta$  es l'angle de deflexió (rad),  $T$  és la torsió (N·m),  $l$  és la longitud (m),  $a$  i  $b$  són els semieixos del perfil,  $G$  és el mòdul de cisalla (GPa).

A l'aïllar  $t$ , ens queda la següent expressió:

$$t \geq \frac{T l (a^2+b^2)}{4\pi(ab)^{5/2} G \theta} \quad \text{Equació 6.6}$$

Per tant s'agrupa en el factor comú  $B'$  les diferents variables que corresponen als paràmetres de forma i no a les propietats del material.

$$B' = \frac{T l (a^2 + b^2)}{4\pi(ab)^{5/2} \theta}$$

Equació 6.7

Es troba l'índex de Selecció de material.

$$t \geq \frac{B'}{G}$$

Equació 6.8

Per tant per poder obtenir un gruix mínim, el mòdul de cisalla haurà d'esser màxim.

$$t_{min} \rightarrow G_{max}$$

Com es vol trobar un material de millors propietats que l'actual, es limiten les característiques de l'alumini 6005 T6 (mòdul de cisalla 26,2 GPa, límit elàstic 212 MPa i densitat 2.700 kg/m<sup>3</sup>).

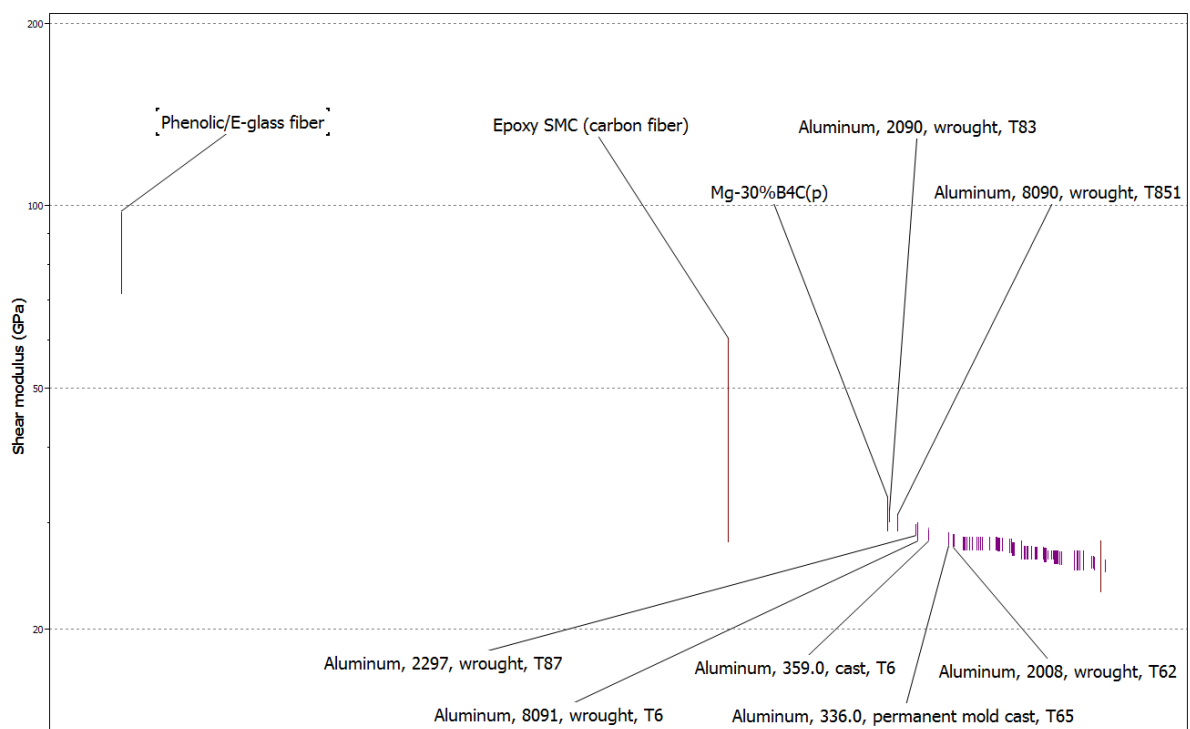


Fig. 6.4 Diagrama amb els materials ordenats segons el seu mòdul de cisalla (G).

Un cop aplicada aquesta limitació, els deu materials amb el millor índex de material i els seus valors de mòdul de cisalla llisten a la taula següent:

Taula 6.4 Materials més idonis per un gruix mínim de perfil

Material	Mòdul de cisalla, G (Gpa)
Fenòlic/E-glass fiber	71.5-98.2
Epoxi SMC (fibra de carboni)	27.8-60.5
Mg30% B4C(p)	29-33
Alumini 2090, forja, T83	30-31.5
Alumini 8090, forja, T851	29-31
Alumini 8091, forja, T6	28-30
Alumini 2297, forja, T87	28.6-29.8
Alumini 389.0, cast, T6	28-29.4
Alumini 336.0,permanent mold cast, T65	27.5-28.9
Alumini 2010, forja, T62	27.3-28.7

Com es pot observar en la taula anterior el material més idoni per a la producció d'una pala d'aerogenerador amb el menor gruix de perfil possible és el compòsit de fibra de vidre tipus E en una matriu fenòlica igual que en el cas 1.

### 6.3.3. Cas 3 Selecció del material amb mínim cost

Per tal de determinar el material amb el menor cost, es partirà de l'expressió que ens relaciona el cost per unitat de massa i la massa

$$C = m C_{mat} \quad \text{Equació 6.9}$$

On  $m$  és la massa de la pala i  $C_{mat}$  el preu del material per unitat de massa.

$$m = A l \rho \quad \text{Equació 6.10}$$

On  $A$  és l'àrea,  $l$  la longitud i  $\rho$  la densitat.

Al combinar-les obtenim que el cost de la peça ve donat per:

$$C = A l \rho C_{mat} = \pi (a + b) t l \rho C_{mat} \quad \text{Equació 6.11}$$

En aquest cas es bloquejaran els valors que afecten a les dimensions i a l'esforç de torsió a excepció del gruix, ja que l'interès radica en trobar el mínim cost per a un gruix també mínim. per tant l'expressió resultant fent ús de la expressió de  $t$  del cas anterior (Equació 6.6) queda:

$$C = \pi (a + b) \frac{T l (a^2 + b^2)}{4 \pi (ab)^{5/2} G \theta} l \rho C_{mat} \quad \text{Equació 6.12}$$

D'on s'aïlla sota el factor  $C'$  els paràmetres de forma.

$$C' = \pi (a + b) \frac{T l (a^2 + b^2)}{4 \pi (ab)^{5/2} G \theta} l \quad \text{Equació 6.13}$$

Quedant la següent expressió.

$$M = C' \times \frac{\rho C_{mat}}{G} \quad \text{Equació 6.14}$$

D'on s'extreu que l'índex de selecció és:

$$M = \frac{\rho c_{mat}}{G}$$

Equació 6.15

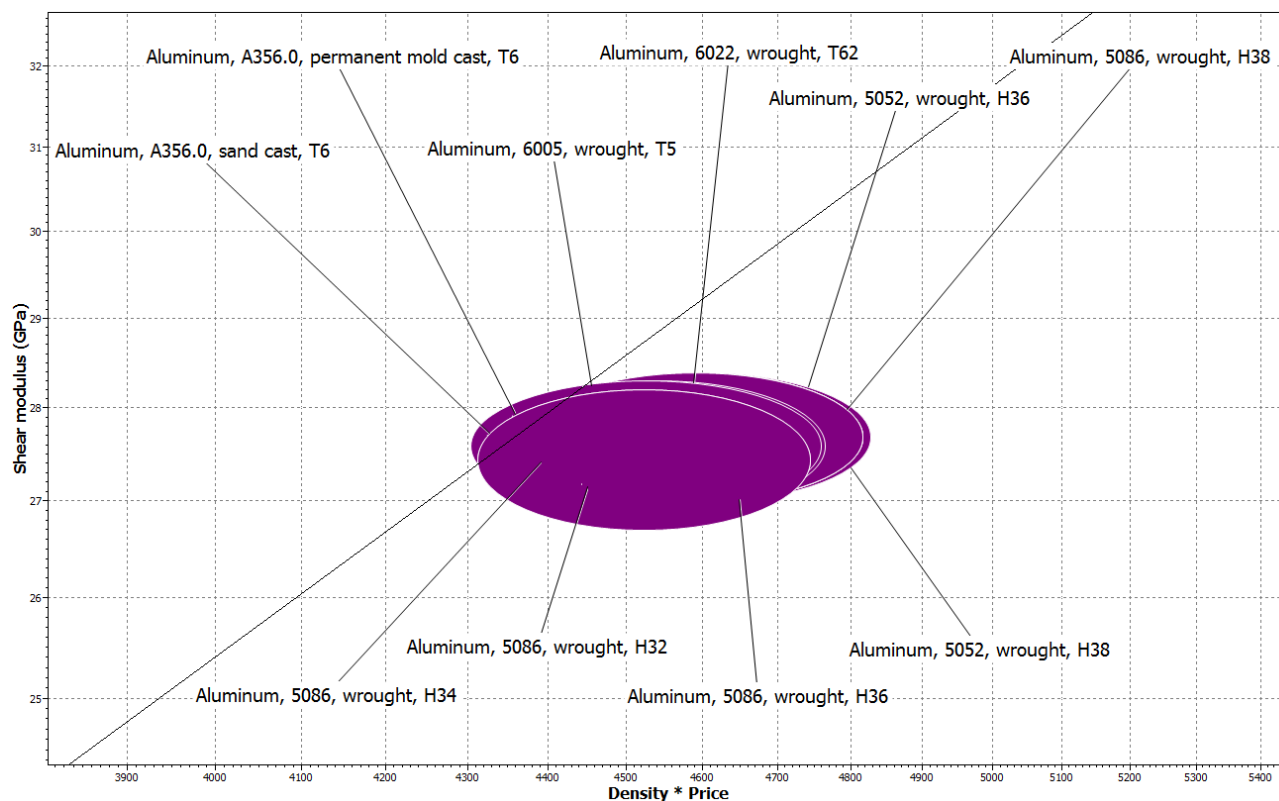


Fig. 6.5 Diagrama d'Ashby on es representa mòdul de cisalla (G) contra densitat ( $\rho$ ) per Cost del material ( $c_{mat}$ )

Com es pot observar en la figura anterior (Fig. 6.5) en aquest cas només compleixen els requisits materials de la família dels metalls. Els més idonis per a obtenir un mínim cost, són els següents:

Taula 6.5 Materials que ofereixen un menor cost.

Material	Mòdul de cisalla, G (GPa)
Alumini, A356.0, fosa de sorra, T6	26,7 - 28,2
Alumini, A356.0, fosa motllo permanent, T6	26,7 - 28,2
Alumini, 6005, forja, T5	26,9 - 28,3
Alumini, 6022, forja, T62	26,9 - 28,3
Alumini, 5052, forja, H36	27 - 28,4
Alumini, 5086, forja, H38	27 - 28,4
Alumini, 5086, forja, H34	27 - 28,4
Alumini, 5086, forja, H32	27 - 28,4
Alumini, 5086, forja, H36	27 - 28,4
Alumini, 5052, forja, H38	27 - 28,4

Com s'observa en la Taula 6.5 s'obté una selecció de materials amb uns mòduls de cisalla molt similars i per una lleugera diferencia el material que permetrà una producció a menor cost és l'alumini A356.0 T6 per fabricació amb motllos de sorra.

## 6.4. Materials seleccionats

Per seguir amb la selecció del material més idoni per a la fabricació de les pales d'un aerogenerador, es trien els quatre millors materials de cada cas.

Els materials seleccionats són els següents:

Taula 6.6 Selecció dels millors quatre materials de cada un dels tres casos plantejats.

Material	Densitat (kg/m <sup>3</sup> )	Mòdul de cisalla (GPa)	Límit Elàstic (MPa)	Cost (Eur/kg)
Fenòlic/E-glass fiber	1850	84,85	368,5	20,55
Epoxi SMC (fibra de carboni)	2075	44,15	248,5	18,3
Alumini 2010, forja, T62	2720	28	200	1,73
Alumini 5456, forja, H321	2655	27,7	210,5	1,745
Mg30% B4C(p)	2165	31	282	18,45
Alumini 2090, forja, T83	2600	30,75	434,5	8,06
Alumini, A356.0, Fosa sorra, T6	2685	27,45	205	1,69
Alumini, A356.0, Fosa motllo permanent, T6	2685	27,45	252	1,69
Alumini, 6005, forja, T5	2705	27,6	255,5	1,68
Alumini, 6022, forja, T62	2690	27,6	290,5	1,685

Prenen les dades de la taula anterior es calculen els paràmetres d'angle de deflexió, gruix, i cost del material fent us de les expressions esposades en cada cas de l'apartat 6.3.



Taula 6.7 Resultats dels paràmetres de selecció dels materials seleccionats

Característica	Fenòlic/E-glass fiber	Epoxi SMC (fibra de carboni)	Alumini 2010 T62 (Forja)	Alumini 5456 H321 (Forja)	Mg 30%B4C	Alumini 2090 T83 (Forja)	Alumini A356.0 T6 (Fosa de sorra)	Alumini A356.0 T6 (Fosa motllo permanent)	Alumini 6005 T5 (Forja)	Alumini 6022 T62 (Forja)
Angle	0,15	0,19	0,24	0,26	0,3	0,48	0,25	0,31	0,31	0,35
Gruix (mm)	1,3	1,7	2,2	2,3	2,8	3,8	2,3	2,8	2,8	3,5
Cost Material (Eur/kg)	245,8	245,5	30,43	29,96	258,3	135,5	29,34	29,34	29,39	29,31

Com es pot apreciar en la Taula 6.7, el material que presenta un mínim angle de deflexió (color grog) i un mínim gruix (color vermell), és la fibra de vidre tipus E en base fenòlica. per altra banda, el material que permet una construcció més econòmica (color verd), és l'alumini 6022 T62 per a forja.

## 6.5. Taula de ponderació

En aquest apartat, es realitzarà la taula de ponderació en les que s'exposarà les diferents característiques a tenir en compte a l'hora de seleccionar el material per a la construcció de les pales de l'aerogenerador. A cada característica, se li adjudicarà un pes en funció de la seva importància i serà puntuada entre 1 i 10 per poder obtenir finalment una puntuació global de l'afinitat del material amb el producte.

Per a les característiques, s'han escollit les tractades en els apartats anteriors i s'ha afegit la propietat de reciclabilitat del material. Així doncs la distribució de les puntuacions queda de la següent manera:

- Angle → 30%
- Gruix → 30%
- Cost material → 30%
- Reciclabilitat → 10% (en aquest apartat la puntuació només serà 1 per a no reciclable i 10 per als materials reciclables)

Les taules de ponderació queden de la següent manera

Taula 6.8 Taula de ponderació dels materials seleccionats

Característica	Pes	Fenòlic/E-glass fiber	Epoxi SMC (fibra de carboni)	Alumini 2010 T62 (Forja)	Alumini 5456 H321 (Forja)	Mg 30%B4C	Alumini 2090 T83 (Forja)	Alumini A356.0 T6 (fosa de sorra)	Alumini A356.0 T6 (Fosa motllo permanent)	Alumini 6005 T5 (Forja)	Alumini 6022 T62 (Forja)
Angle	20%	10	9	6	5	8	7	2	1	4	3
Gruix	10%	10	9	4	3	8	7	2	1	6	5
Cost Material	30%	2	3	5	6	1	4	9	8	7	10
Reciclabilitat	10%	1	0	5	5	5	5	5	5	5	5
Total	100%	6,7	6,4	5,5	5,2	6,1	6,4	4,9	4	6,1	6,4

Segons els criteris exposat, de les taules de ponderació s'extreu que el material més idoni per a la fabricació de les pales de l'aerogenerador, és la fibra de vidre classe E amb una matriu fenòlica. amb una lleugera diferencia els següents materials més aptes serien l'alumini 5456 H321 per a forja, l'alumini 6022 T62 per a forja i l'alumini A356.0 T6 per a producció en motllo de sorra.

## 7. Exposició dels resultats

En aquest apartat del projecte, s'exposaran els resultat obtinguts i es compararan les característiques que aporta el nou material, fibra de vidre classe E amb una matriu fenòlica, front a les del material que actualment s'utilitza, AL 6005 T6, per saber si realment és una opció vàlida.

Primerament exposarem les dades obtingudes a partir dels càlculs exposats en els casos analitzats.

Taula 7.1 Comparativa del material seleccionat amb l'original

Característiques	AL 6005 T6	Fibra de vidre E amb matriu fenòlica	Comentaris
Angle (graus)	0,27	0,14	Reducció 51,8%
Gruix (mm)	2,5	1,3	Reducció 52 %
Cost Material (EUR/kg)	29,62	245.88	Increment 830%
Reciclabilitat	Si	No	-

Com es pot observar en la taula anterior, de les categories tractades, s'aprecia una reducció en els camps de l'angle de deflexió i el gruix, però per contra es produeix un gran augment en el cost del material i un canvi passant a un material no reciclable.

## 8. Estudi econòmic

En la realització del present projecte, s'han de valorar les següents despeses efectuades.

### Desplaçaments:

17 Tutories (8€/viatge): 136€

1 Visita al camp de proves de Technoflex (10€/viatge): 10€

### Hores de treball:

17 hores de tutor (18€/hora): 306€

365 hores d'enginyer tècnic (12€/hora): 4380€

### Material:

Paquet de folis DIN-A4: 5€

Tinta d'impressió (50% del cartutx): 8€

- Cartutx de tinta: 16€

Base de dades CES Edupack: 3500 €/ any

### Electricitat:

365 h d'us d'electricitat y Internet (7 mesos): 245 €

- Internet: 30 €/mes.
- Connexió elèctrica: 20 €/mes.

**Total Pressupost: 8598 €**

## 9. Impacte ambiental

Degut a que es tracta d'un projecte teòric, no presenta cap altre impacte ambiental que el propi de la seva reproducció reprogràfica.

D'altra banda si les pales s'arribessin a produir, s'hauria de tenir en compte que estarien fetes d'un material polimèric. La matriu seleccionada és resina base fenòlica, un polímer termostable. Això voldria dir, que no podria ésser usat per fer noves produccions. L'única opció possible és la descomposició del material mitjançant reaccions químiques i els materials que no es poden reutilitzar es dipositen en un digestor, per finalment obtenir biogàs.

## Conclusions

Primerament cal mencionar que els criteris emprats per dur a terme la selecció de materials per a la fabricació d'una pala d'aerogenerador, són aquells que podrien fer l'aerogenerador més competitiu sense haver d'entrar en el camp de l'aerodinàmica del perfil.

Segons la selecció realitzada, ha resultat que el material més adient per a la producció de les pales dels aerogeneradors, ha estat la fibra de vidre tipus E en una matriu fenòlica. Aquest material gràcies a la millora de propietats vers l'alumini emprat actualment, permetrà un funcionament més estable de l'aerogenerador degut a la disminució de pes que suposa la reducció del gruix del perfil i la menor deflexió que pateix la pala.

També cal mencionar, que aquest material, permet realitzar pales de major longitud amb una pes similar a les que tenen actualment ampliant així l'àrea efectiva de l'aerogenerador, i per tant augmentant la seva potència.

Per altra banda s'ha de tenir en compte que altres empreses productores podrien prioritzar la reducció de cost en la producció (on l'alumini segueix sent la opció més competitiva) per davant de la millora de prestacions, degut a que sovint en els mercats és més important tenir un preu baix que una bona qualitat.





## **Agraïments**

Vull agrair la constància i suport de la Mònica Martínez durant tot el projecte i el seu esforç per impartir docència desde una perspectiva pràctica.

A la Mercè Segarra, per haver explicat diversos casos pràctics similars i facilitat documentació tècnica.

A la Universitat de Barcelona per donar-me accés al programa CES Edupack 2014 per poder fer la selecció de materials del projecte.



## Bibliografia

### 9.1. Referències bibliogràfiques

<sup>1</sup> James F. Manwell, Jon G. McGowan, Anthony L. - *Wind Energy Explained* - Modern wind energy and its origins

<sup>2</sup> Imatge: Recreació del sistema eòlic d'Alexandria  
<http://www.islandnet.com/~see/weather/graphics/photos0910/heronwindorgan.jpg>

<sup>3</sup> Imatge: Molins eòlics tradicionals perses  
<http://tectonicablog.com/wp-content/uploads/2012/04/windmill-3-copy-resize-455x341.jpg>

<sup>4</sup> Imatge: Molí Smock Windmill  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Smock\\_mill#/media/File:DK\\_Fanoe\\_Windmill01.JPG](https://en.wikipedia.org/wiki/Smock_mill#/media/File:DK_Fanoe_Windmill01.JPG)

<sup>5</sup> Imatge: Marcellus Jacobs amb el seu aerogenerador  
<http://www.jacobswind.net/wp-content/uploads/2011/01/ML-on-tower.jpg>

<sup>6</sup> Imatge Parts d'un aerogenerador: Documentació interna Industrias Technoflex

<sup>7</sup> Informació perfils NACA  
<http://airfoiltools.com/>

<sup>8</sup> Imatge Adaptada: Perfil NACA 00XX  
<http://i146.photobucket.com/albums/r262/theclencher/naca.png>

<sup>9</sup> Imatge: Aerogeneradors tipus HAWT  
[http://www.mie-uc.cl/wp-content/uploads/2013/03/parque\\_eolico.jpg](http://www.mie-uc.cl/wp-content/uploads/2013/03/parque_eolico.jpg)

<sup>10</sup> Imatge: Aerogenerador tipus Savonius  
[http://www.ecosources.info/images/energie\\_batiment/eolien\\_vertical\\_darrieus.png](http://www.ecosources.info/images/energie_batiment/eolien_vertical_darrieus.png)

<sup>11</sup> Imatge: Aerogenerador tipus Darrieus

[http://www.ecosources.info/images/energie\\_batiment/eolien\\_vertical\\_darrieus.png](http://www.ecosources.info/images/energie_batiment/eolien_vertical_darrieus.png)

<sup>12</sup> Imatge: Aerogenerador Darrieus tipus H de 3 pales

[http://www.ecosources.info/images/energie\\_batiment/eolien\\_vertical\\_darrieus.png](http://www.ecosources.info/images/energie_batiment/eolien_vertical_darrieus.png)

<sup>13</sup> Imatge: Aerogenerador tipus Helicoïdal

[http://www.ecosources.info/images/energie\\_batiment/eolien\\_vertical\\_darrieus.png](http://www.ecosources.info/images/energie_batiment/eolien_vertical_darrieus.png)

<sup>14</sup> Informació Productes Urban Green

<http://www.ugei.com/es/products/uge-4k/especificaciones>

<sup>15</sup> Informació productes Ropatec

<http://www.ropatec.it/>

<sup>16</sup> Informació productes Ropatec

<http://www.ropatec.it/>

<sup>17</sup> Informació productes Quite revolution

<http://www.quietrevolution.com/qr5/qr5-turbine.htm>

<sup>18</sup> Informació productes Kliux

<http://www.kliux.com/wp-content/uploads/2011/03/Ficha-tecnica-geo-4k.pdf>

<sup>19</sup> Informació productes Windworks

<http://www.allsmallwindturbines.com/>

<sup>20</sup> Informació productes Sawt

<http://www.sawtenergy.com/p5000.html>

<sup>21</sup> Informació productes Technoflex

<http://www.technoflex.es/>

<sup>22</sup> Volker Quaschnig - Understanding renewable energy systems - Utilization of Wind Energy

<sup>23</sup> Martin O. L. Hansen - Aerodynamics of Wind Turbines - One-dimensional momentum theory for an ideal wind turbine

<sup>24</sup> Documentación interna Industrias Technoflex

<sup>25</sup> Robert L. Norton - *Diseño de maquinas. Un enfoque integrado* - Esfuerzo, deformación unitaria y flexión